

## 1. Загальні відомості про космічний простір [Л1].

Космічні польоти здійснюються у складних астрономічних і фізичних умовах космічного простору.

**Космос** (від грец. *κοσμος* – порядок) – синонім астрономічного визначення Всесвіту [31, 32].

**Всесвіт** (від лат. *unibersum* – світ у цілому) – нескінченний у часі та просторі світ, безмежно різноманітний за формами, яких набуває матерія в процесі свого розвитку. Всесвіт у широкому розумінні – предмет досліджень усього природознавства, а у вузькому – в основному астрономії.

**Астрономія** (від грец. *αστρο* – зірка, *νομος* – закон) – наука про будову та розвиток космічних тіл, утворених ними систем і Всесвіту в цілому. Основними розділами астрономії є: *космогонія* – наука про походження та розвиток космічних тіл і їхніх систем; *космологія* – наука про еволюцію Всесвіту; *астрофізика* – наука про фізичні явища у Всесвіті; *небесна механіка* – наука про рух тіл Сонячної системи у загальному гравітаційному полі [27]. Незважаючи на те, що терміни “Всесвіт” і “космос” є синонімами, на практиці під **космічним простором** розуміють не весь Всесвіт, а лише його навколосемну частину за межами атмосфери. Космічний простір умовно поділяють на навколосемний, міжпланетний та міжзоряний. Крім того, часто виділяють ближній космос, що досліджується за допомогою ШСЗ, КА та міжпланетних станцій, і далекий космос – світ зірок і галактик. 28 Границі ближнього космосу визначаються межами та розмірами Сонячної системи, основні відомості про яку викладені нижче [26, 31, 32, 44].

### 1.1. Загальні відомості про всесвіт і сонячну систему

Всесвіт містить незліченну множину *небесних тіл* – планет, зірок, комет, метеорів, їхніх систем та інших космічних утворень, які виникають у процесі руху матерії. Небесні (космічні) тіла у Всесвіті поєднуються в системи, складові частини яких зв’язані між собою силами тяжіння. Основним станом речовини у Всесвіті є *плазма*.

**Плазма** (від грец. *πλάσμα* – виконане, створене) – іонізований газ, що містить практично однакову кількість позитивних і негативних зарядів. У стані плазми при дуже високій температурі може перебувати будь-яка речовина. Тому плазму розглядають як *четвертий* (крім твердого, рідкого і газоподібного) агрегатний стан речовини. У стані плазми перебуває більша частина речовини Всесвіту: зірки, галактичні туманності та міжзоряне середовище.

**Галактика** (від грец. *γαλαξια* – молочний) – це система зірок. У наш час відомо близько 1 млрд. галактик. Залежно від розмірів в одній галактиці міститься близько 10<sup>12</sup> зірок. Галактики спостерігаються у вигляді світлих туманних плям круглої, овальної або неправильної форми. Найближчі до Сонця галактики – Магелланові туманності. Сукупність галактик, доступних для спостереження із Землі, називають *метagalактикою*. Кількість зірок у метagalактиці становить понад 10<sup>21</sup>. До неї входить і наша Галактика, число зірок у якій складає близько 10<sup>11</sup>, а їхня загальна маса перевершує масу Сонця в 10<sup>11</sup> разів. Радіус нашої Галактики оцінюється приблизно в 15000 *пс*(парсек).

**Парсеком** називається відстань, що рівняється річному паралаксу в 1” (кутову секунду).

**Річний паралакс** – це кут, під яким можна бачити середній радіус орбіти Землі із точки, що перебуває на перпендикулярі, проведеному із центра Сонця до площини цієї орбіти. Середній радіус орбіти Землі (середня відстань від Землі до Сонця) називається астрономічною одиницею (*a.o.*) і становить  $r_{1a.o.} = 149597000 \text{ км} \approx 150 \cdot 10^6 \text{ км}$ . Крім *a.o.* для виміру великих відстаней використовують і більшу одиницю – світловий рік (*св. рік*) – відстань, що проходить світло за 1 рік. Нагадаємо, що швидкість світла у вакуумі  $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ км/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . Виходячи із цього, можна одержати такі співвідношення:  $1 \text{ пс} = 206265 a.o. = 3,26 \text{ св. року} = 30,8568 \cdot 10^{12} \text{ км}$ ;  $1 \text{ св. рік} = 9,46053 \cdot 10^{12} \text{ км}$ . Сонце перебуває на відстані  $10000 \text{ пс}$  від центра нашої Галактики, який розташований у напрямку сузір'я Стрільця.

**Сонячна система** – це множина небесних тіл, які рухаються у гравітаційному полі Сонця. До її складу входять (табл. 1.1): а) центральне тіло – Сонце; б) вісім великих планет з 34 супутниками; в) близько 2000 малих планет (астероїдів); г) більше 600 комет; д) безліч метеорних тіл та міжпланетний пил. Відстань, на якій спостерігаються об'єкти Сонячної системи, обмежується орбітою Плутона. Сонячна система рухається разом з нашою Галактикою по майже коловій орбіті зі швидкістю близько  $250 \text{ км/с}$ . Період обертання Сонячної системи навколо центра нашої Галактики становить близько  $200 \text{ млн. років}$ . Вік Сонячної системи вважається рівним близько  $5 \text{ млрд. років}$  [10]. Сонце – газоподібне розпечене небесне тіло кулястої форми, найближча до Землі “зірка”. Маса Сонця  $M_s \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ . У ньому зосереджено  $99,866\%$  маси всієї Сонячної системи. Середній радіус Сонця  $R_s \approx 7 \cdot 10^5 \text{ км}$ , що приблизно в  $110$  разів більше середнього радіуса Землі. Найменша відстань від Землі до Сонця (в перигелії, січень)  $r_{c \text{ min}} = 147,1 \cdot 10^6 \text{ км}$ , а найбільша (в афелії, липень)  $r_{c \text{ max}} = 152,1 \cdot 10^6 \text{ км}$ . Температура Сонця перебуває в межах від  $4000$  до  $2 \text{ млн K}$ , при цьому його середня температура становить  $T_{so} = 6000 \text{ K}$ . Освітленість Землі Сонцем (поза атмосферою)  $E_s \approx 136000 \text{ лк}$ , що у  $548000$  разів вище, ніж освітленість Землі Місяцем [26]. На практиці для наземних та бортових засобів КСС суттєве значення має кутовий розмір (кутовий діаметр) Сонця як небесного світила, який складає  $\psi_s \approx 0,5^\circ$ , що можна знайти за формулою  $\psi_s \approx 2R_s / r_c$ . (1.1) *Приклад 1.1.* Розрахувати середній кутовий діаметр Сонця  $\psi_s$  для наземного спостерігача. Знайти мінімальне  $\psi_{s \text{ min}}$  та максимальне  $\psi_{s \text{ max}}$  значення цього параметру. *Розв'язання.* Використовуючи значення середнього радіуса Сонця  $R_s \approx 7 \cdot 10^5 \text{ км}$  і середню  $r_c \approx 149,6 \cdot 10^6 \text{ км}$ , мінімальну  $r_{c \text{ min}} \approx 147,1 \cdot 10^6 \text{ км}$  та максимальну  $r_{c \text{ max}} \approx 152,1 \cdot 10^6 \text{ км}$  відстань від Землі до Сонця, із формули (1.1) знайдемо:  $\psi_s \approx 32,17'$ ;  $\psi_{s \text{ min}} \approx 31,6'$ ;  $\psi_{s \text{ max}} \approx 32,7'$ .

**Планети** (від грец. *πλανήτης* – блукаючий) – це “холодні” небесні тіла Сонячної системи. Більшість із планет видимі із Землі неозброєним оком завдяки відбиваній ними сонячній енергії. Орбіти усіх планет за формою близькі до окружності та мають невеликий нахил одна до іншої. Таким чином, Земля як цікавий для теорії польоту КА об'єкт, перебуває у системі небесних тіл. А це означає, що на ШСЗ діють як гравітаційні, так і електромагнітні сили не тільки Землі, а і усіх небесних тіл, що утворюють Сонячну систему.

## 2. Основні системи координат в механіці космічних польотів [Л1].

При вивченні руху КА і небесних тіл застосовують ряд систем координат (СК). Їх різноманіття визначається різними факторами. В залежності від розв'язуваної задачі при розрахунках користуються тією СК, в якій математичні вирази, що описують рух тіла, мають найбільш простий і зручний вигляд. Для опису будь-якої СК достатньо задати *почато відліку, опорну площину, напрямок осей.*

В залежності від місця положення початку відліку координат СК діляться на:

- ✓ *геліоцентричні* – з початком відліку координат у центрі мас Сонця;
- ✓ *геоцентричні* – з початком відліку координат у центрі мас Землі;
- ✓ *топоцентричні* – з початком відліку координат у пункті спостереження на поверхні Землі;
- ✓ *барицентричні* – з початком відліку координат у центрі мас КА;
- ✓ *планетоцентричні* – з початком відліку координат у центрі мас планет;
- ✓ *селеноцентричні* – з початком відліку координат у центрі мас Місяця.

В залежності від вибору основної (опорної) площини (ОП) СК діляться на:

- ✓ *екваторіальні* – ОП являє собою площину екватора;
- ✓ *екліптичні* – ОП являє собою площину екліптики;
- ✓ *горизонтальні* – ОП - площина місцевого горизонту;
- ✓ *орбітальні* – ОП - площина орбіти.

В залежності від вибору напрямку осей систем відносно просторових орієнтирів СК діляться на:

- ✓ *інерціальні (абсолютні)* - осі координат нерухомі в часі;
- ✓ *відносні* – осі координат переміщуються.

В залежності від форми СК діляться на:

- ✓ *прямокутні;*
- ✓ *криволінійні.*

Криволінійні СК в свою чергу діляться на:

- ✓ *циліндричні;*
- ✓ *сферичні;*
- ✓ *еліпсоїдальні;*
- ✓ *параболічні.*

*Для геоцентричних і геліоцентричних СК необхідно зазначити момент часу (epoch), до якого віднесена прийнята СК.*

*Епоха – момент часу, для якого дається значення будь-якої величин, що змінюються з часом і визначають орієнтування СК або визначають положення небесного світила.*

Розглянемо СК, які найбільш часто використовуються при описі руху КА.

**Абсолютна (інерціальна) геоцентрична прямокутна екваторіальна СК (АГСК)** (коротко будемо називати абсолютна геоцентрична СК). Систему будемо позначати  $Ox_A Y_A Z_A$ . Рис.1.

Її початок знаходиться в центрі Землі. Опорна площина – площина екватора. Ось  $X_A$  спрямована в точку весіннього рівнодення (ТВР). Вісь  $Z_A$  – направлена вздовж осі обертання Землі в сторону Північного полюсу. Вісь  $Y_A$  доповнює систему до правої. Положення об'єкта, що рухається, в даній СК задається поточними значеннями його координат  $X_A, Y_A, Z_A$  і значеннями проекції вектора лінійної швидкості  $V_X, V_Y, V_Z$  на

координатні осі. Інколи в цій системі координат використовують полярні сферичні координати.

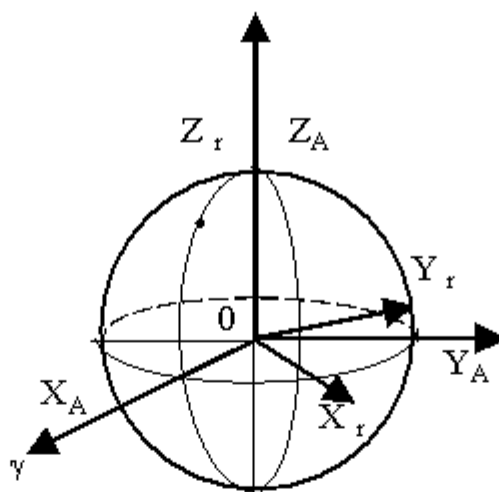


Рис.1

**Відносна (гринвіцька) геоцентрична прямокутна екваторіальна СК (ВГСК).** Систему будемо позначати  $X_r Y_r Z_r$ . Рис. 2.

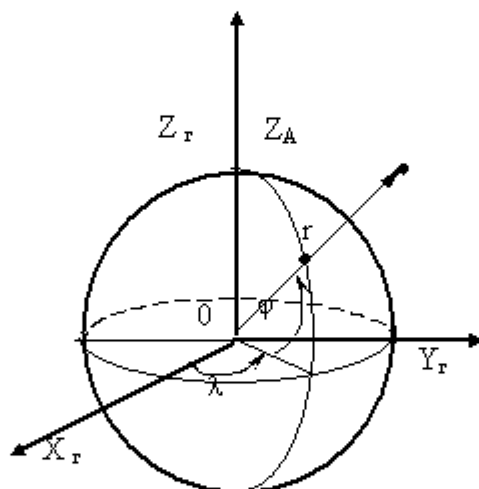


Рис.2.

Початок СК також розташовано в центрі Землі. Ось  $X_r$  направлена в точку перетинання Гринвіцького меридіану з екватором, тобто система ВГСК обертається разом з Землею. Будується аналогічно з АГСК і збігається з нею один раз на добу, коли співпадають напрямлення вісі  $OX_r$  та напрямлення на ТВР.

Положення об'єкту в цій системі координат задається поточними значеннями його координат  $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $Z_r$  і значеннями проєкцій вектора лінійної швидкості  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  на координатні осі. На основі ВГСК можливо задати геоцентричну сферичну систему координат (ГССК) котра також обертається разом з землею. Кути в ній відраховуються від площин та осей ВГСК.

Положення тіла в ній задається відстанню  $r$  від центра Землі до центру мас КА, географічною довготою  $\lambda$  та географічною широтою  $\varphi$  проєкції КА на поверхню Землі.

**Прямокутна топоцентрична система координат (ПТСК) Рис. 3.**

Її початок знаходиться в точці П стояння спостерігача на поверхні Землі. Координати точки П визначаються її географічною довготою  $\lambda$  та географічною широтою  $\varphi$ . Основна площина - площина місцевого горизонту (дотична до точки П). Вісь  $X_T$  направлена по дотичній до меридіану системи спостереження у бік Північного полюсу. Вісь  $Y_T$  у здовж радіус-вектора з центра Землі у точку П, вісь  $Z_T$  доповнює

систему до правої. Положення об'єкта що рухається, у даній системі координат задається поточними значеннями його координат  $X_T$ ,  $Y_T$ ,  $Z_T$  та значеннями проєкцій вектора лінійної швидкості  $V_X$ ,  $V_Y$ ,  $V_Z$  на координатні осі.

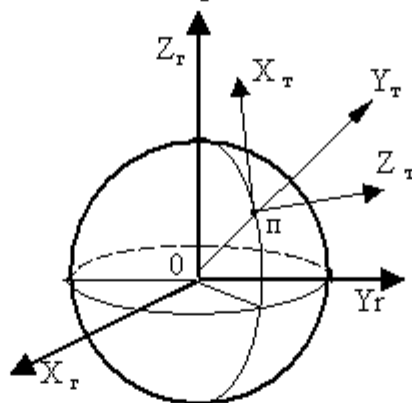


Рис.3

### Сферична топоцентрична система координат (СТСК) Рис. 4.

Початок СК знаходиться в точці П стояння спостережного пункту. Опорна площина – площина місцевого горизонту. Положення об'єкта в цій СК визначається кутом місця  $\alpha$ , азимутом  $\beta$  та похилою дальністю  $D$ .

*Кутом місця* називається плоский кут, який відраховується від проєкції похилої дальності на площину місцевого горизонту  $\Pi X_T Z_T$  до напрямку на об'єкт спостереження. Діапазон зміни від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

*Азимутом* називається плоский кут, який лежить в площині місцевого горизонту та відраховується від напрямку на обраний орієнтир до напрямку на проєкцію похилої дальності на площину місцевого горизонту по ходу годинникової стрілки. Значення азимута лежать в межах від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ .

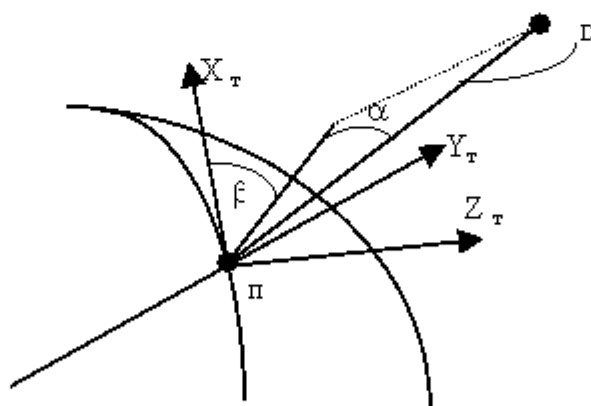


Рис.4.

*Похила дальність* – це найкоротша відстань від спостерігача до об'єкта.

### 3. Системи рахування часу [Л1].

Відповідно до закону взаємодії тіл сонячної системи КА здійснюють рух в просторі з плином часу. Тому для опису цього руху необхідно знати основні одиниці і системи рахування часу.

Залежно від вирішуваних задач, при описі руху КА використовують різноманітні одиниці і системи рахування часу, при чому найчастіше виникає необхідність перерахування часу з однієї системи в іншу.

### **Одиниці виміру часу.**

Основною одиницею виміру часу в небесній механіці є доба.

**Доба** – це проміжок часу, за який Земля робить один повний оберт навколо своєї осі відносно якоїсь точки на небесній сфері.

**Зоряна доба (ЗД)** – проміжок часу між двома послідовними однойменними (верхніми або нижніми) кульмінаціями ТВР для спостерігача на тому ж самому меридіані. Зоряна доба починається в момент верхньої кульмінації ТВР.

**Кульмінація** – явище проходження світила через небесний меридіан. У верхній кульмінації висота світила максимальна, в нижній кульмінації – мінімальна.

**Зоряний час** – це час, що відраховується від моменту верхньої кульмінації ТВР до будь-якого іншого її положення і виражений в долях зоряної доби.

**Істинна сонячна доба (ІСД)** – проміжок часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями центра видимого диска Сонця (істинного Сонця) на тому ж самому меридіані. Іншими словами ІСД – час повного обертання Землі відносно центру видимого диска Сонця.

**Істинний сонячний час** – час, що відраховується від моменту нижньої кульмінації істинного Сонця (початок ІСД) до будь-якого іншого його положення і виражається в долях ІСД – годинах, хвилинах, секундах. ІСД в середньому (тривалість їх не постійна) 3 хвилини 56 секунд довші зоряної. Так як істинна сонячна доба коливається по тривалості на протязі року, тому вводять одиницю виміру часу – середню сонячну добу.

**Середня сонячна доба (ССД)** – це час повного оберту Землі відносно середнього екваторіального Сонця або проміжок часу між двома послідовними кульмінаціями середнього екваторіального Сонця на тому ж самому географічному меридіані.

**Середнє екваторіальне сонце (СЕС)** – уявлювана точка небесної сфери, що рухається рівномірно в площині екватора так, що її довгота в будь-який момент часу збігається із середньою довготою істинного Сонця.

Початком ССД вважається момент нижньої кульмінації СЕС (середня опівніч). Все людство живе за середнім сонячним часом. Тривалість ССД дорівнює 24 години, або 1440 хв., або 86400 секунд.

Тривалість зоряної доби на 3 хв. 56 сек. Мента та дорівнює 23 год. 56 хв. 04 сек. або 86254 сек.

Коефіцієнт пропорційності  $q = T_{ССД} / T_{ЗД} = 1.002738$ .

В основі сучасного календаря лежить **тропічний рік (ТР)** – проміжок часу між двома послідовними проходженнями середнього Сонця через ТВР.  $1 \text{ ТР} = 365.2422 \text{ ССД} = 366.24223 \text{ ЗД}$ . ТР містить не цілу кількість діб, що на практиці незручно. Тому по Григоріанському календарю календарний рік містить 365 ССД, а кожний четвертий (високосний) - 366 ССД.

### **Системи рахування часу.**

*В залежності від місця рахування часу в ТП КА використовуються різні системи рахування.*

**Місцевий час** – це час даного меридіану. Місцевий час може бути зоряним *S*, істинним *to* або середнім сонячним *tm*. Точки, що лежать на одному меридіані, в один і той же момент мають однаковий час.

**Всесвітній час** –  $t_{\Gamma}$  – це місцевий середній сонячний час (МССЧ) гринвічського меридіану. МССЧ будь-якого пункту на Землі визначається виразом:

$$t_m = t_{\Gamma} + \lambda^h,$$

де  $\lambda^h$  - географічна довгота пункту в часовій мірі, яка рахується позитивною на схід від Гринвіча.

$$\lambda^h = \lambda / \omega_3,$$

де  $\lambda$  - географічна широта в градусах,  $\omega_3$  - кутова швидкість Землі (15гр./ч.).

**Поясний час** –  $t_{\Pi}$  – це МССЧ основного географічного меридіану того часового поясу, в якому розташований даний пункт.  $t_{\Pi} = t_{\Gamma} + n$ , де  $n$  – номер часового поясу.

Часові пояси – це 24 ділянки Земної поверхні вздовж основних меридіанів. Ширина їх 15 гр. По довготі. Нулевий основний меридіан – Гринвічський. Відраховуються пояси на схід від нього. Україна знаходиться в другому часовому поясі. Різниця поясного часу в двох пунктах дорівнює різниці номерів їх часових поясів.

**Ефемеридний час** – це час, що плине цілком рівномірно. Він застосовується для теоретичного вивчення руху небесних тіл і прогнозування їх положень (ефемерид).

Для КА вводиться ще ряд часів.

**Польотний час** -  $t_{\text{ПОЛ}}$  – це середній сонячний час, що відраховується від моменту старту ракети-носія, яка виводить КА на орбіту.

**Орбітальний час** -  $t_{\text{ОРБ}}$  – це зоряний час, який прив'язаний до якоїсь точки на орбіті (як правило, до апогею або перигею).

**Бортовий час** -  $t_{\text{Б}}$  – це середній сонячний час, який відраховується від характерних точок положення КА на орбіті. Ці точки визначаються цільовими задачами КА.

### *Література*

1. Фриз П.В. Основи орбітального руху космічних апаратів: підручник /П.В. Фриз . – Житомир: ЖВІ НАУ, 2012. –348 с.: іл.
2. Манойлов В.П., Омельчук В.В., Опанюк В.В. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації. – Житомир: ЖДТУ, 2008. – 384с.